第37卷 第6期
2020年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 37 No. 6
Nov. 2020

2000—2016年山西境内黄河流域侵蚀性降雨特征分析

宁 婷， 马晓勇， 刘树敏

（山西省环境科学研究院，山西 太原 030027）

摘 要： 基于2000—2016年山西境内黄河流域71个气象站逐日降雨观测资料，采用空间插值等方法分析了侵蚀性降雨的时空变化特征。结果表明：17 a间，研究区年侵蚀性降雨量在189.84～443.72 mm，平均为305.08 mm，占多年平均降雨量的61.5%；空间分布上，总体呈现由东南向西北递减的变化趋势，存在中条山东部山地和吕梁山中南部山地2个侵蚀性降雨中心；年内分配上，呈现先上升后下降的变化趋势，最大值出现在7月；89%的侵蚀性降雨量集中在暖季（每年5—9月），其中7—9月是水土流失防控的关键期；71个气象站多年平均侵蚀性降雨量与多年平均降雨量之间存在极显著线性相关关系，年侵蚀性降雨量及其所占比例均随年降雨量增加而增加。

关键词： 年降雨量；年侵蚀性降雨量；空间分布；年内分配；集中度；黄河流域

山西地处黄河中游，黄土高原东缘，黄河流经山西省境965 km，境内黄河流域面积97 138 km^2，占全省国土总面积的62.2%。黄河流域（山西段）地形以山地和丘陵为主，山高坡陡，沟壑纵横，水流湍急，破坏力强，加之大多数地区为黄土覆盖区，土质疏松，极易流失，致使其成为全国水土流失最严重的区域之一[1]。

当前，国家及黄河流域各省份正加紧编制黄河生态保护治理规划，有关黄河流域的学术探讨逐渐成为生态环境领域的研究热点。水土流失是黄河中游地区面临的最突出的生态问题，而降雨是引起水土流失的主要动力因素[2]。为此，有必要对区域侵蚀性降雨特征进行分析。此前，有学者对黄土高原侵蚀性降水的时空变化特征进行了较为系统的研究，发现黄土高原地区年侵蚀性降雨量时空变化明显，且与年降雨量变化具有同步性[3-4]；也有学者在省区层面开展了相关研究，例如孙智辉等[5]利用陕西省黄土高原地区42个站点的逐日降水观测资料，分析了陕西省黄土高原地区侵蚀性降水的变化特征。山西省是黄河泥沙的主要来源区之一，但目前尚缺乏针对山西境内黄河流域侵蚀性降雨的具体研究。

本文利用2000—2016年山西境内黄河流域71个气象站点逐日侵蚀性降雨量资料，计算多年平均侵蚀性降雨量并进行空间内插，分析其时空分布特征，并探讨了年侵蚀性降雨量与年降雨量之间的变化关系，以期为研究区水土流失防治和生态建设工作提供数据基础和科学依据。

1 研究区概况

山西境内黄河流域总面积97138 km^2，包括入黄支流、汾河、沁河和涑水河4个亚流域，对应面积为39274 km^2、39826 km^2、12264 km^{2}和5774 km^2，分别占研究区总面积的40.4%、41.0%、12.6%和6.0%[6]。气候属于温带半湿润半干旱大陆性季风气候，年降雨量400～600 mm，平均降雨量大约500 mm。降雨量相对较少且季节分配不均，具体表现为：冬季干旱少雨、夏季降雨充沛、秋雨多于春雨，70%以上的降雨量

集中在7—9月。研究区水土流失严重，20世纪80年代年均输沙量达3.66×10^8 t[7]，21世纪初为2.7×10^8 t。经过坚持不懈的水土流失治理，林草覆盖率

收稿日期： 2020-01-03； **修订日期：** 2020-04-02
基金项目： 山西省省属科研条件质量提升专项项目（山西能源基地生态环境遥感实验室）
作者简介： 宁婷（1990-），女，工程师，硕士，主要从事生态遥感工作. E-mail: ningting1990@126.com
通讯作者： 马晓勇. E-mail: sxhkysts@163.com

在不断提高，入黄泥沙量逐年减少。其中，黄河流经市县林草覆盖率已接近60%，向黄河的年输沙量由20世纪末的1.2×10^{8} t减少到目前的1.7×10^{7} t[8]。

2 数据与方法

2.1 基础数据

本文采用的基础数据为2000—2016年山西境内黄河流域71个气象站点（图1）的逐日侵蚀性降雨资料。降雨量测定方法为雨量计法。由于冷、暖季侵蚀性降雨在历时、雨强等方面有明显差异，基于日降雨量的降雨侵蚀力模型在参数率定时也会区分冷、暖季[9]。因此，本研究在探讨侵蚀性降雨的年内分配特征时，将全年分为暖季（5—9月）和冷季（10月至翌年4月）。

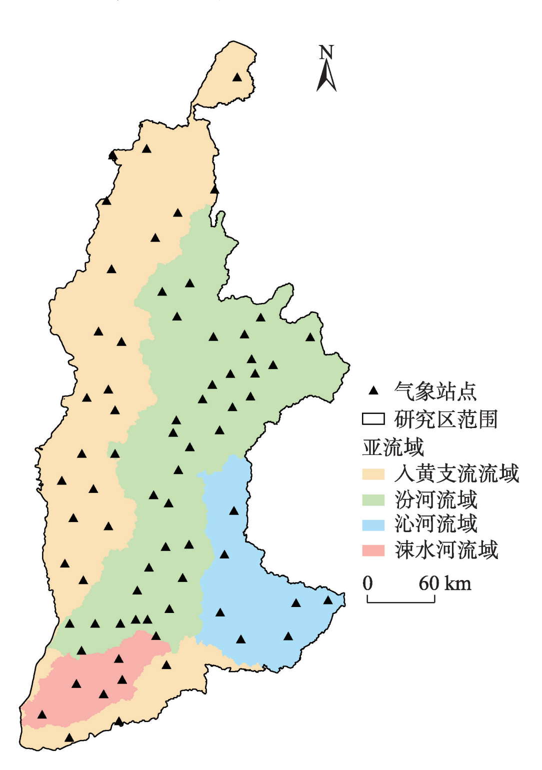


图1 研究区气象站点分布示意图

Fig. 1 Distribution of weather stations in the study area

2.2 研究方法

2.2.1 年侵蚀性降雨量的计算 本文侵蚀性降雨标准采用日降雨量≥12 mm[10]。年侵蚀性降雨量计算公式如下：

$$P_{y12}=\sum_{i=1}^{n}P_{d12(i)}$$

式中：P_{y12}为年侵蚀性降雨量；P_{d12}为日侵蚀性降雨量；n为一年之中侵蚀性降雨天数。

另外，采用研究区内71个气象站点同时期观测到的侵蚀性降雨量的平均值代表研究区侵蚀性降雨量。亚流域侵蚀性降雨量为同时期亚流域内所有气象站点观测到的侵蚀性降雨量的平均值。

2.2.2 侵蚀性降雨量的空间插值 在ArcGIS 10.2中采用Kriging方法对71个气象站点多年平均侵蚀性降雨量进行空间内插，得到空间连续分布的侵蚀性降雨量值，栅格输出分辨率250 m。

2.2.3 侵蚀性降雨量年内集中度的计算 通过月侵蚀性降雨量反映侵蚀性降雨量年内变化特征，并借鉴降雨侵蚀力集中度的表述方法[11]，以集中度C来表示侵蚀性降雨量年内分配的集中状况，计算公式如下：

$$C=\frac{\mathrm{Max}\left(\sum_{i=1}^{3}P_{m12(i)}\right)}{P_{y12}}\times100\%$$

式中：P_{m12}为多年平均月侵蚀性降雨量；$\mathrm{Max}\left(\sum_{i=1}^{3}P_{m12(i)}\right)$为连续最丰3个月的侵蚀性降雨总量；$P_{y12}$为多年平均侵蚀性降雨量。

3 结果与分析

3.1 侵蚀性降雨量总体情况

2000—2016年，研究区年降雨量在379.19（2001年）~675.47 mm（2003年），平均为496.32 mm；年侵蚀性降雨量在189.84（2001年）~443.72 mm（2003年），平均为305.08 mm，占多年平均降雨量的61.5%（表1）。

从亚流域层面来看，多年平均降雨量（P）、侵蚀性降雨量（P_{y12}）的大小关系均表现为：汾河流域<涑水河流域<入黄支流流域<沁河流域。这与其地理位置、地形地貌等直接相关。研究区降雨不均衡，除呈现由东南向西北递减的总体趋势外，山地丘陵区的降雨也普遍高于河谷盆地区[12]。同时，入黄支流流域包含晋西、晋南2个片区，地域跨度大，各站点之间降雨差异也较大。这使其降雨指标排序变得复杂化，虽然多年平均降雨量、侵蚀性降雨量在4个亚流域中相对较高，但侵蚀性降雨比例却最低。此外，研究区侵蚀性降雨发生频率平均为12.3 d·a^{-1}，日侵蚀性降雨量均值为24.80 mm。以沁河流域侵蚀性降雨天数和平均日侵蚀性降雨量最多；汾河流域虽然侵蚀性降雨天数最少，但平均日侵蚀性降雨量相对较高。

表1　研究区及亚流域侵蚀性降雨概况统计表

Tab. 1　Statistical table of erosive rainfall in the study area and sub-basins

流域/亚流域	多年平均降雨量 P/mm	多年平均侵蚀性降雨量 P_{y12}/mm	侵蚀性降雨比例/%	侵蚀性降雨天数/d	平均日侵蚀性降雨量/mm
入黄支流流域	504.99	303.64	60.1	12.4	24.49
汾河流域	474.29	292.87	61.7	11.7	25.03
沁河流域	586.51	372.93	63.6	14.7	25.37
涑水河流域	488.68	304.60	62.3	12.6	24.17
研究区	496.32	305.08	61.5	12.3	24.80

以多年平均侵蚀性降雨量最少、最多以及最接近研究区平均值的河曲、垣曲、蒲县为例，对研究期内观测到的历次侵蚀性降雨进行统计(图2)。17 a间，河曲、蒲县、垣曲观测到的侵蚀性降雨的天数分别为171 d、209 d和263 d，其中一半的降雨量在12~20 mm。次降雨量越大的降雨事件，其发生频率越低，次降雨量超过50 mm的降雨事件河曲6 d、蒲县12 d、垣曲23 d。观测到的3个站点日侵蚀性降雨量最大值分别为124.7 mm(2012年7月21日)、90.2 mm(2003年8月26日)和244 mm(2007年7月30日)。已有研究表明，这种极端降雨事件往往对区域水土流失产生决定性影响[13-14]。

3.2　侵蚀性降雨的空间分布格局

研究区多年平均侵蚀性降雨量P_{y12}总体上呈现由东南向西北递减的趋势(图3)。兴县—汾阳—介休一带以北地区P_{y12}普遍在300 mm以下，约占研究区总面积的1/3；沁河流域以及晋南入黄支流流域东部地区P_{y12}普遍在350 mm以上，约占研究区总面积的一半；其他区域P_{y12}在300 ~ 350 mm。

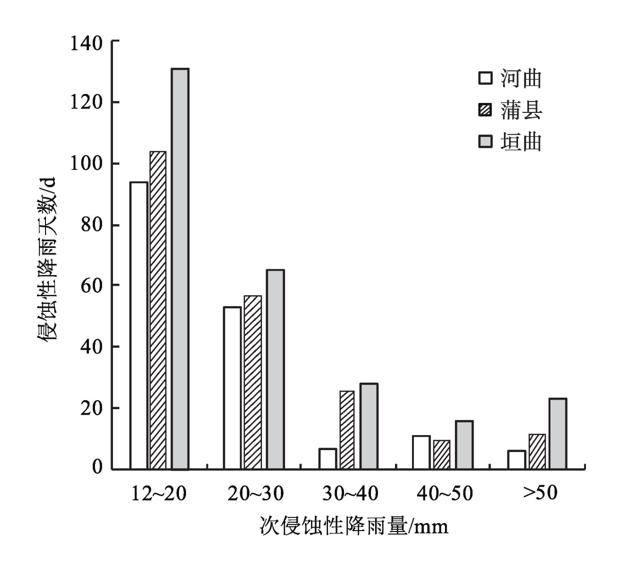


图2　典型气象站点侵蚀性降雨量区间统计

Fig 2.　Interval statistics of erosive rainfall at typical weather stations

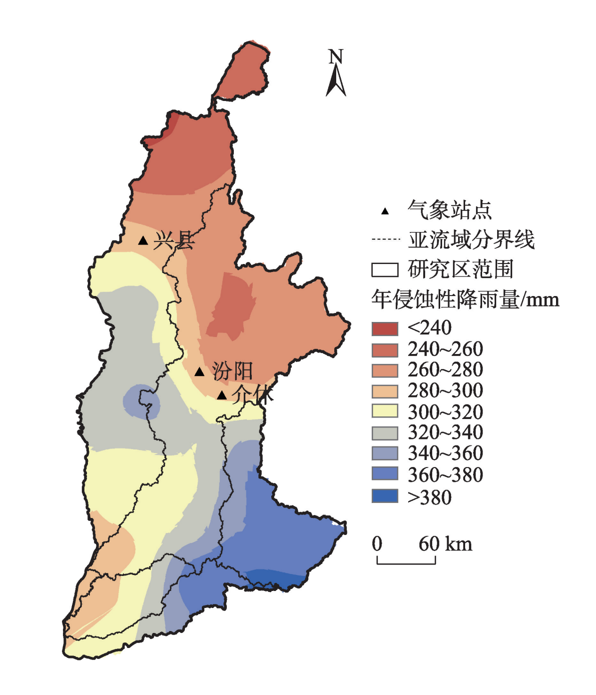


图3　研究区年侵蚀性降雨量的空间变化

Fig. 3　Variation of annual erosive rainfall in the study area

研究区有2个侵蚀性降雨中心，一个是中条山东部山区(垣曲县)，地处研究区的东南边缘，海拔高，降水丰富，侵蚀性降雨频次多、总量大；另一个是吕梁山中南部山区(交口县)，受特殊地形和局地气候的影响，多短时强降水，17 a间共观测到50 mm以上的降雨24次，使其年侵蚀性降雨量明显高于周边地区。此外，这2个侵蚀性降雨中心分别位于伏牛山—中条山国家级水土流失重点治理区和黄河多沙粗沙国家级水土流失重点治理区，水土流失防治任务艰巨。

3.3　侵蚀性降雨的年内分配特征

分析侵蚀性降雨的年内分配特征，可判断土壤侵蚀危险期，以便采取有效的防控措施。研究区及四大亚流域侵蚀性降雨总体上呈现先上升后下降

的季节变化趋势，峰值均出现在7月（图4）。侵蚀性降雨的季节变化十分明显[15]，春、冬两季侵蚀性降雨较少，夏季稍多，秋季7—9月的侵蚀性降雨量明显高于其他月份。

相较而言，降雨量相同的情况下，暖季降雨比冷季降雨的侵蚀力要大[9]。研究区暖季（5—9月）的侵蚀性降雨量占到年侵蚀性降雨量的89.0%，冷季（10月至翌年4月）仅占11.0%（表2）。侵蚀性降雨集中期为每年的7—9月，集中度C高达70%，是土壤侵蚀防控的关键期。比较来看，4大亚流域中入黄支流流域的侵蚀性降雨较分散，集中度为63.3%，土壤侵蚀防控期更长。

3.4 年侵蚀性降雨量与年降雨量的变化关系

3.4.1 年际变化关系 季风气候的不稳定性带来研究区不同年份降雨的波动。17 a间，研究区年降雨

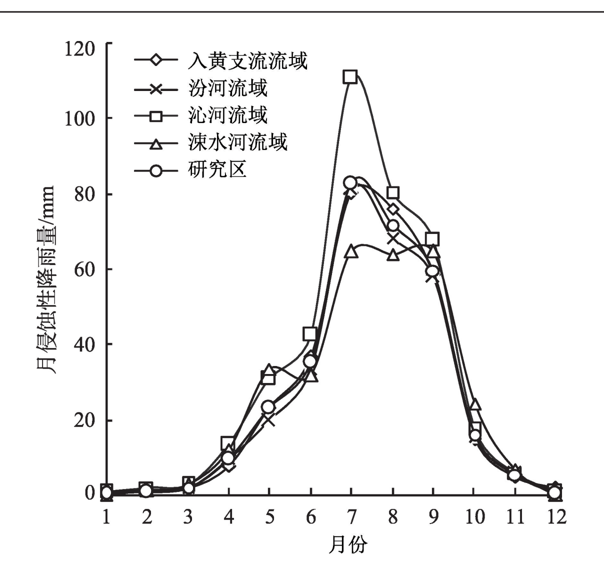


图4 研究区侵蚀性降雨量的年内分配

Fig. 4 Intra-annual distribution of erosive rainfall in the study area

表2 研究区冷、暖季的侵蚀性降雨情况

Tab. 2 Erosive rainfall during the cold and warm seasons in the study area

流域/亚流域	年侵蚀性降雨量/mm	暖季侵蚀性降雨		冷季侵蚀性降雨		7—9月侵蚀性降雨	
		降雨量/mm	比例/%	降雨量/mm	比例/%	降雨量/mm	集中度/%
入黄支流流域	304.60	257.99	84.7	46.61	15.3	192.87	63.3
汾河流域	303.64	274.35	90.4	29.29	9.6	214.49	70.6
沁河流域	372.93	331.74	89.0	41.19	11.0	258.68	69.4
涑水河流域	292.87	260.01	88.8	32.86	11.2	207.32	70.8
研究区	305.08	271.59	89.0	33.49	11.0	213.69	70.0

量、年侵蚀性降雨量变异系数分别为0.16和0.24，总体波动性一般，后者较高。二者的年际变化表现出高度的协同性，均呈现趋势性上升特征（图5）。

3.4.2 空间变化关系 研究区71个气象站点多年平均降雨量P与多年平均侵蚀性降雨量P_{y12}之间存在极显著相关关系，可用线性关系式P_{y12}=0.77P−77.75（R^2=0.929，P<0.01）拟合（图6）。侵蚀性降雨量

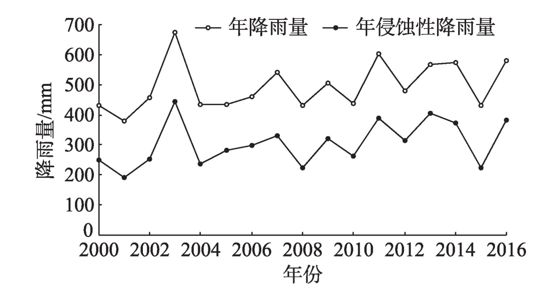


图5 2000—2016年研究区降雨量与年侵蚀性降雨量

Fig. 5 Annual rainfall and annual erosive rainfall in the study area from 2000 to 2016

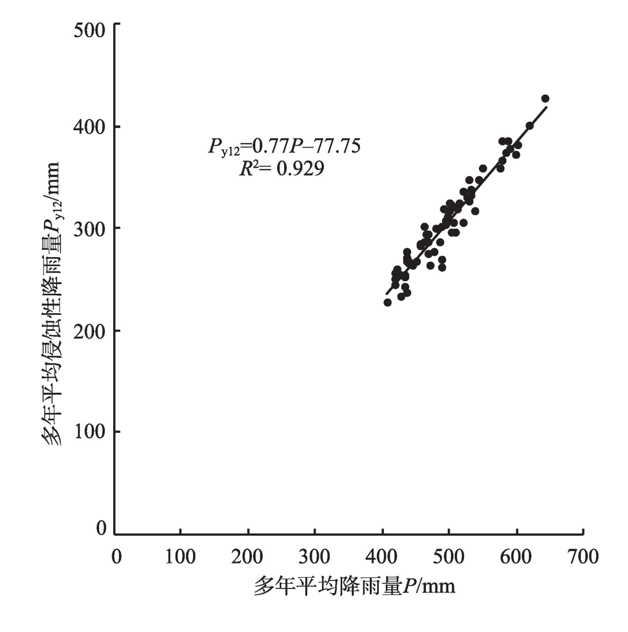


图6 研究区71个气象站点P_{y12}与P之间的关系

Fig. 6 Relationship between P_{y12} and P at 71 weather stations in the study area

整体上随着降雨量的增加而增加。对上述拟合关系式的等号两端分别除以年降雨量P,变形为新的等式 $\frac{P_{y12}}{P}=0.77-\frac{77.75}{P}$。该等式的等号左端即年侵蚀性降雨量占年降雨量的比例,右端即与年降雨量之间的关系。可见,年降雨量越大,侵蚀性降雨所占的比例一般也越高。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 2000—2016年山西境内黄河流域侵蚀性降雨量在189.84 ~ 443.72 mm,平均为305.08 mm,约占多年平均降雨量的61.5%。平均每年有12.3 d侵蚀性降雨,其中一半日降雨量在12 ~ 20 mm。

(2) 研究区侵蚀性降雨量总体呈现由东南向西北递减的空间变化趋势,存在中条山东部山区和吕梁山中南部山区2个侵蚀性降雨中心。

(3) 研究区侵蚀性降雨量年内分配不均,呈现先上升后下降的变化趋势,最大值出现在7月。89%的侵蚀性降雨量集中在暖季(每年5—9月),冷季(10月至翌年4月)仅占11%。进一步分析表明,75%的侵蚀性降雨量集中在每年7—9月,这一时期是水土流失防控的关键期。

(4) 研究区71个气象站多年平均侵蚀性降雨量P_{y12}与多年平均降雨量P之间呈极显著线性相关关系,可用关系式$P_{y12}=0.77P-77.75$($R^2=0.929$, $P<0.01$)来估算。年侵蚀性降雨量及其所占比例均随年降雨量增加而增加。

4.2 讨论

(1) 极端强降雨(暴雨)对年侵蚀性降雨的贡献。雨量等级划分中,凡24 h内降水量超过50 mm的降雨过程统称为暴雨。2000—2016年,研究区72个站点共观测到侵蚀性降雨1750次,总降雨量44378.9 mm,其中,暴雨109次,总降雨量8281.6 mm。暴雨场次仅占6.2%,对侵蚀性降雨量的贡献率却达18.7%。暴雨不仅雨量大,雨强、雨量动能也大,由此产生更大的侵蚀力。一场50 mm的降雨与一场20 mm的降雨相比,降雨量相差4.2倍,但降雨侵蚀力却相差10倍以上[16]。极端强降雨频发是黄土高原水土流失严重的主要原因之一[17-18]。

(2) 侵蚀性降雨比例与年降雨量的关系。已有研究表明,丰水期侵蚀性降雨所占比重高于枯水期[4]。本研究中,年降雨量最少的2001年,研究区侵蚀性降雨比例为50.1%;年降雨量接近多年平均值的2009年该比例为63.2%;年降雨量最多的2003年该比例达到65.7%,证实了侵蚀性降雨比例:丰水年>平水年>枯水年。并且,通过拟合方程进一步表明,研究区71个气象站点侵蚀性降雨比例随年降雨量增加而增加。在丰水年,研究区(特别是两个侵蚀性降雨中心)要采取有效措施,加强水土流失防控。

参考文献(References):

[1] 贺晓娟, 韩锦涛. 山西省水土流失空间分布和现状[J]. 江西农业学报, 2007, 19(3): 97−98. [He Xiaojuan, Han Jintao. Spatial distribution status of soil and water loss in Shanxi province[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2007, 19(3): 97−98.]

[2] 舒若杰. 降雨能量对水土流失的影响研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(2): 196−200. [Shu Ruojie. Research progress of influence of rainfall energy on soil and water loss[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2013, 24(2): 196−200.]

[3] 张岩, 朱清科. 黄土高原侵蚀性降雨特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(6): 99−103. [Zhang Yan, Zhu Qingke. Statistic analysis of erosive rainfall on the Loess Plateau[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(6): 99−103.]

[4] 信忠保, 许炯心, 马元旭. 近50年黄土高原侵蚀性降水的时空变化特征[J]. 地理科学, 2009, 29(1): 98−104. [Xin Zhongbao, Xu Jiongxin, Ma Yuanxu. Spatio-temporal variation of erosive precipitation in loess plateau during past 50 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(1): 98−104.]

[5] 孙智辉, 刘志超, 曹雪梅, 等. 陕西省黄土高原地区侵蚀性降水变化特征[J]. 水土保持通报, 2010, 30(4): 36−39. [Sun Zhihui, Liu Zhichao, Cao Xuemei, et al. Variation characteristics of erosive rainfall on the Loess Plateau of Shaanxi province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(4): 36−39.]

[6] 山西省水利厅. 山西省水资源公报[R]. 2017. [Shanxi Provincial Department of Water Resources. Shanxi Provincial Water Resources Bulletin[R]. 2017.]

[7] 李仰斌. 山西省水土保持生态环境建设面临的问题与对策[J]. 中国水土保持, 2000(9): 4−6. [Li Yangbin. Problems and countermeasures facing soil and water conservation and ecological environment construction in Shanxi province[J]. China Soil and Water Conservation, 2000(9): 4−6.]

[8] 骆惠宁. 建设沿黄生态屏障 推动流域地区高质量发展[J]. 求是, 2019(22): 50−52. [Luo Huining. Construction of ecological barriers along the Yellow River to promote high-quality development in river basin[J]. Qiushi, 2019(22): 50−52.]

[9] 殷水清, 章文波, 谢云, 等. 基于高密度站网的中国降雨侵蚀力空间分布[J]. 中国水土保持, 2013(10): 45−51. [Yin Shuiqing, Zhang Wenbo, Xie Yun, et al. Spatial distribution of rainfall ero-

sivity in China based on high-density station networks[J]. Soil and Water Conservation in China, 2013(10): 45-51.]

[10] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 6-11. [Xie Yun, Liu Baoyuan, Zhang Wenbo. Study on standard of erosive rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(4): 6-11.]

[11] 殷水清, 谢云. 黄土高原降雨侵蚀力时空分布[J]. 水土保持通报, 2005, 25(4): 29-33. [Yin Shuiqing, Xie Yun. Spatial variations and seasonal distributions of rainfall erosivity on Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2005, 25(4): 29-33.]

[12] 张晨, 王翠红, 严俊霞, 等. 1971—2011年汾河流域降水时空特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 57-67. [Zhang Chen, Wang Cuihong, Yan Junxia, et al. Spatiotemporal variation of precipitation in the Fenhe river basin during the period of 1971-2011[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 57-67.]

[13] 卫伟, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵沟壑区极端降雨事件及其对径流泥沙的影响[J]. 干旱区地理, 2007, 30(6): 896-901. [Wei Wei, Chen Liding, Fu Bojie, et al. Extreme rainfall events and their effects on runoff and sediment yield in the Loess hilly area [J]. Arid Land Geography, 2007, 30(6): 896-901.]

[14] 陈瑞东, 温永福, 高鹏, 等. 极端降水条件下延河水沙特征对比分析及其影响因素[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 1920-1929. [Chen Ruidong, Wen Yongfu, Gao Peng, et al. Comparative analysis of flow and sediment characteristics of the Yanhe River under extreme rainfall conditions and research on influence factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 1920-1929.]

[15] 张红英, 李毓富, 刘耀文, 等. 山西东南部气温和降水极值研究[J]. 干旱区研究, 2018, 35(3): 589-596. [Zhang Hongying, Li Yufu, Liu Yaowen, et al. Extreme values of temperature and precipitation in Southeast Shanxi province[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(3): 589-596.]

[16] 宁婷, 桑满杰, 郭新亚, 等. 山西省2000—2016年降雨侵蚀力时空分布特征[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(1): 1-7. [Ning Ting, Sang Manjie, Guo Xinya, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of rainfall erosivity during 2000-2016 in Shanxi province[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(1): 1-7.]

[17] 吴艳, 白建勤, 张晓萍, 等. 基于日雨量的长武县53年来降雨量及侵蚀力演变趋势分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4): 38-42. [Wu Yan, Bai Jianqin, Zhang Xiaoping, et al. Trend analysis of precipitation and its erosivity over 53 years based on the daily rainfall in Changwu county[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(4): 38-42.]

[18] 李慧娟, 高建恩, 张元星, 等. 延安极端降雨特性分析及对梯田侵蚀灾害影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 79-84. [Li Huijuan, Gao Jian'en, Zhang Yuanxing, et al. Analysis of Yan'an extreme rainfall characteristics and impacts of erosion disasters on terraces[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6): 79-84.]

Characteristics of erosive rainfall in the Yellow River Basin in Shanxi from 2000 to 2016

NING Ting, MA Xiao-yong, LIU Shu-min

(*Shanxi Academy of Environmental Sciences*, *Taiyuan* 030027, *Shanxi*, *China*)

Abstract: Based on daily rainfall data collected at 71 weather stations in the Yellow River Basin in Shanxi province from 2000 to 2016, the spatial and temporal changes of erosive rainfall were analyzed using spatial interpolation and other methods. The results showed that annual erosive rainfall amount in the study area ranged from 189.84 to 443.72 mm, with an average of 305.08 mm, accounting for about 61.5% of the multi-year average rainfall. In terms of spatial distribution, the annual erosive rainfall showed an increasing trend from northwest to southeast. There were two erosive rainfall centers, one located in the eastern Zhongtiao Mountain and the other in the mid-southern Luliang Mountain. In terms of intra-annual distribution, erosive rainfalls amounts increased then decreased over the year, reaching a maximum in July; 89% of erosive rainfall was concentrated in the warm season (May to September). Moreover, July to September was a key period for soil erosion prevention and control. There was a strong significant linear correlation between the multi-year average erosive rainfall and multi-year average rainfall at 71 weather stations. Both annual erosive rainfall and its proportion generally increased with increasing annual rainfall.

Keywords: annual rainfall; annual erosive rainfall; spatial distribution; intra-annual distribution; concentration; Yellow River Basin